



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/10151>

To cite this version :

Yann DUPLESSIS KERGOMARD, Frédéric DAU, Sebastian HEIMBS - Choc mou basse énergie sur composite interlock 3X: approche expérimentale et numérique - Matériaux & Techniques - Vol. 100, n°6-7, p.11p. - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Choc mou basse énergie sur composite interlock 3X : approche expérimentale et numérique

Y. Duplessis Kergomard¹, F. Dau¹ et S. Heimbs²

¹ Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux (I2M), Département DURabilité Matériaux Assemblages Structures (DUMAS), site Arts et Métiers ParisTech (AMP), esplanade des arts et métiers, 33405 Talence Cedex, France
e-mail : frederic.dau@ensam.eu ; dkyann@hotmail.com
² EADS Innovation Works, 81663, Munich, Germany
e-mail : sebastian.heimbs@eads.net

Mots-clés :
Endommagements ; choc mou ;
composite 3D ; expérimental ;
numérique

Résumé – Dans ce travail, on s'intéresse aux mécanismes d'endommagement qui apparaissent lors d'un choc mou entre un impacteur déformable en caoutchouc et une plaque composite tissée 3D (interlock 3X). Des impacts basses énergies sont réalisés à l'aide d'une tour de chute. L'impacteur en caoutchouc est de forme hémisphérique. La cible, obtenue par procédé RTM, est en fibre de carbone et résine RTM 6. Plusieurs impacteurs de différentes dureté et de différents diamètres d'une part, et des tissus avec différents degrés de renfort 3D d'autre part, sont disponibles pour cette étude pour permettre une analyse de variabilité ultérieure. Dans ce papier, les résultats obtenus avec un impacteur de diamètre 40 mm sont présentés. L'accent est mis à la fois sur les moyens expérimentaux employés pour l'analyse des endommagements (Analyse par stéréo-corrélation d'images, Thermographie IR, Micrographie) et sur les développements numériques menés en parallèle (FEM) avec le logiciel Abaqus. Contrairement aux composites stratifiés UD, la notion de délaminage n'est plus appropriée pour ce type de composite tissé 3D. Des décohésions et ruptures de torons ainsi que des fissurations matricielles sont majoritairement identifiées.

Key words:
Damage; soft impact;
3D composite; experimental;
numerical

Abstract – Low energy soft impact on interlock3X composite: experimental and numerical approach. Analyzing damage mechanisms when a deformable impactor is impacting a reinforced 3D woven composite (interlock 3X) is aimed in this work. Low energy impacts are considered in this soft shock configuration using a drop test tower. Materials involved in this study are hemispherical rubber impactors and carbon fibers in RTM 6 resin for the composite target plate. Elastomer impactors with different hardness and diameters and composite plates with different degrees of reinforcement in the thickness are available for this study so that the influence of impact conditions (mass, hardness, diameters, 3D reinforcement, ...) on the damage mechanisms could be assessed. The focus of the impact tests presented in this paper will be on the 40 mm impactor. The experimental measurements and analysis (Digital Image Correlation, IR thermography, micrography) as the numerical FEM investigations are particularly highlighted in this paper. In contrast to regular unidirectional composite laminates, no delaminations occur in such a 3D textile composite. Yarn decohesions, matrix cracks and yarn ruptures are identified as the major damage mechanisms.

1	Nous présentons dans ce papier une	I2M/DUMAS (ex LAMEFIP) a conçu, déve-	10
2	partie des résultats obtenus lors	loppé et mis au point des essais expéri-	11
3	du projet ANR VULnérabilité des	mentaux adaptés devant permettre la géné-	12
4	COMPosites dont le principal objectif était	ration d'endommagements dans le cas de	13
5	d'améliorer la description physique des mé-	chocs « mous » : impacteur élastomère (de	14
6	canismes d'endommagement des matériaux	type caoutchouc) sur plaque composite in-	15
7	composites et leur modélisation dans le	terlock 3X. Une approche numérique simpli-	16
8	cas de sollicitations dynamiques extrêmes.	fiée, présentée lors des JNC16 [1] à Toulouse,	17
9	Dans le cadre de ce projet, le laboratoire	a d'abord été mise en oeuvre pour détermi-	18

ner les dimensions des éprouvettes et des	51
conditions aux limites les mieux appropriées	52
pour révéler les endommagements. Elle a	53
ainsi permis de concevoir des montages spé-	54
cifiques pour la mise en évidence de ces en-	55
dommagements [2]. Des campagnes d'essais	56
mettant en oeuvre une métrologie ainsi que	
des moyens d'observation et d'analyses spé-	
cifiques ont alors pu être menées, en colla-	
boration avec les différents partenaires du	
projet, avec comme objectifs :	
– d'analyser les endommagements post-	
impact à l'aide d'analyses microgra-	
phiques et de mesures par thermo-	
graphies IR (<i>collaboration avec la cellule</i>	
<i>de transfert techno THERMICAR et</i>	
<i>l'I2M/TREFLE</i>);	
– d'identifier les modèles de comporte-	
ment et de réaliser des simulations du	
choc mou (<i>collaboration avec Airbus</i>);	
– de valider des développements de la mé-	
thode de reconstruction de champs par	
corrélation d'images (<i>collaboration étroite</i>	
<i>avec le laboratoire LMT Cachan et la société</i>	
<i>Holo3</i>).	
Des résultats d'essais réalisés dans cette	
campagne comparés à des simulations nu-	
mériques font principalement l'objet de la	
présentation qui suit. Les aspects thermo-	
graphie et reconstruction de champs par cor-	
rélation d'images n'y sont pas développés	
pour des raisons de place.	
1 Matériaux	
1.1 Impacteur déformable	
L'impacteur est en caoutchouc de type	
Styrene-Butadiene-styrene (SBS), utilisé	
pour la fabrication des pneus et des se-	
melles de chaussures. Différents impacteurs	
ont été fabriqués, par la société SMAC à	
Toulon, avec différentes duretés shore A	
(SHA) : 40, 60, et 80 et avec des géométries	
hémisphériques de différents diamètres :	
40 mm, 70 mm et 100 mm. Ces impac-	
teurs ont été élaborés en contrôlant leur	
formulation chimique pour privilégier un	
comportement élastique plutôt qu'amor-	
tissant. Pour chaque impacteur, figure 1a,	
l'adhésion à un cylindre en acier de 22 mm	
est assurée lors du processus de fabrica-	
tion. Ce cylindre est vissé sur une partie	
mécanique comprenant une rondelle de	
force piézoélectrique, elle-même fixée sur le	
chariot de la tour de chute. Pour le travail	
présenté dans cet article, l'impacteur de	
diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA est	
utilisé.	
1.2 Cible interlock 3X	57
Les éprouvettes testées sont en composite	58
tissé 3D de type interlock 3X dont la struc-	59
ture est schématisée figure 2. La structure du	60
tissu est composée de torons chaînes droits,	61
de torons déviés (torons 3D) et de torons	62
trames. Trois différentes structures tissées	63
ont été fabriquées, en faisant varier le pour-	64
centage de torons chaînes 3D par rapport	65
aux torons chaînes droits : 30 %, 55 % et	66
100 % associés à différents degrés de ren-	67
fort dans l'épaisseur. Ces composites seront	68
nommés par la suite I30, I55 et I100 lorsque	69
nécessaire.	70
Des plaques composites de 500×500 mm ²	71
ont été élaborées par procédé RTM. La résine	72
utilisée est de type RTM 6. Elle a été injectée à	73
120 °C et polymérisée à 160 °C. Ces plaques	74
ont une épaisseur de 2,7 mm alors que les	75
tissus secs ont une épaisseur de 10 mm.	76
2 Essais d'impact	77
2.1 Montage	78
Les essais sont réalisés sur la tour de	79
chute du laboratoire I2M/DUMAS, figure 1b.	80
L'énergie incidente de l'impact est imposée	81
par la hauteur de chute (qui conditionne la	82
vitesse) et la masse du poids tombant; ce	83
dernier étant composé de l'impacteur et du	84
chariot. La masse du poids tombant est de	85
5,3 Kg. Cinq hauteurs de chutes croissantes	86
sont retenues : 1 m, 1,25 m, 1,5 m, 1,75 m	87
et 2 m. Les énergies incidentes correspon-	88
dantes varient alors de 52 J à 104 J.	89
Les éprouvettes testées ont une dimen-	90
sion de 100×100×2,7 mm ³ . Elles sont encas-	91
trées sur un pourtour circulaire de diamètre	92
70 mm.	93
2.2 Mesures	94
La force et le déplacement du chariot sont	95
mesurés au cours du temps à l'aide, respec-	96

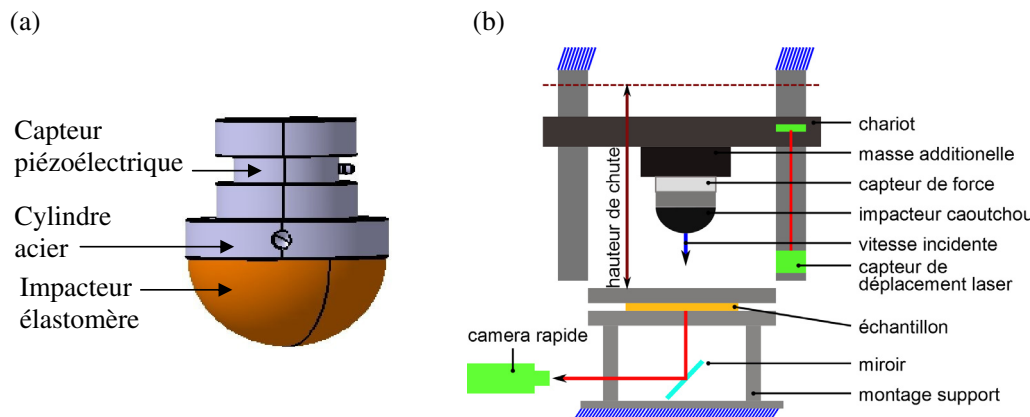


Fig. 1. (a) Impacteur. (b) Tour de chute instrumentée.

Fig. 1. (a) Impacteur. (b) Instrumented drop test tower.

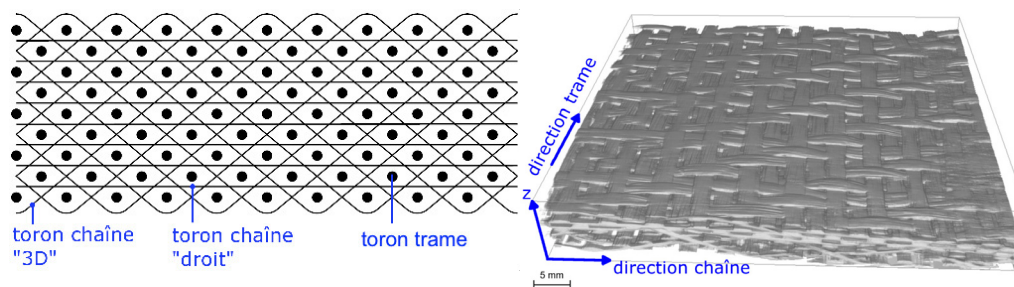


Fig. 2. Tissus interlock 3X.

Fig. 2. Interlock 3X fabric.

1 tivement, d'une rondelle de force placée der-
 2 rière l'impacteur (capteur piezoélectrique) et
 3 d'un capteur laser de déplacement. L'aire
 4 maximale de contact entre l'impacteur et sa
 5 cible est évaluée en relevant l'empreinte ob-
 6 tenue à l'aide d'un papier collé sur l'éprou-
 7 vette et de craie bleue appliquée sur l'impac-
 8 teur. Un exemple d'empreinte est montré sur
 9 la figure 3.

2.3 Vidéos rapides et stéréo-corrélation

12 Deux caméras rapides, une PHOTRON APX
 13 RS et une PHOTRON SA3, permettent de
 14 filmer l'évolution des endommagements dé-
 15 bouchant sur la face arrière de l'éprouvette
 16 ainsi que la déformation de l'impacteur
 17 durant l'impact. Les vitesses d'acquisition
 18 sont de 8400 images/s pour la PHOTRON
 19 APX RS et de 6000 images/s pour la PHO-
 20 TRON SA3. L'encombrement disponible
 21 entre l'éprouvette et le massif étant réduit,
 22 un (ou deux miroirs) orienté(s) à 45° est

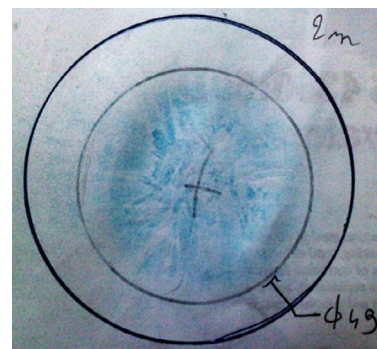


Fig. 3. Exemple d'empreinte relevée.

Fig. 3. Example of chalk print.

(sont) placé(s) entre les deux, permettant de
 renvoyer l'image de la face arrière du com-
 posite vers la caméra PHOTRON APX RS,
 figure 1b.

Les images obtenues par cette caméra
 PHOTRON APX RS seront aussi utilisées
 pour faire de la reconstruction de champs
 par stéréo-corrélation d'images. Cette tech-
 nique permet de suivre le champ de dépla-

1 ciment tridimensionnel de la face arrière 47
2 du composite. Son principe est présentée 48
3 dans [3]. Elle nécessite d’avoir deux points 49
4 de vues différents de la surface observée. Ces 50
5 deux points de vue sont ici obtenus à l’aide 51
6 deux miroirs faisant entre eux un angle de 52
7 150° environ et montés sur un même support
8 fixé au massif, et incliné à 45° par rapport au
9 plan du composite.

10 **2.4 Contrôles**

11 Des contrôles non destructifs des différentes
12 éprouvettes testées sont effectués avant et
13 après essais par thermographie IR. La tech-
14 nique employée est celle dite du flash ar-
15 rière [9]. Elle consiste à exciter thermique-
16 ment la face avant de l’échantillon impacté et
17 à mesurer, à l’aide d’un capteur infrarouge la
18 réponse en température sur la face arrière. Le
19 thermogramme obtenu permet de remonter
20 à la diffusivité [10]. La présence d’endomma-
21 gements est alors révélée par la cartographie
22 de diffusivité, figure 4.

23 Fort des informations fournies par ces
24 cartographies, les éprouvettes sont ensuite
25 découpées, selon les directions chaînes et les
26 directions trames comme indiqué sur la fi-
27 gure 5, pour observer la nature des endom-
28 magements à l’aide d’un microscope op-
29 tique.

30 **3 Modélisation numérique**

31 Dans le cadre de cette étude, les modèles
32 numériques pour simuler les essais d’im-
33 pact précédents sont mis en œuvre à l’aide
34 du code de calculs par éléments finis Aba-
35 quus/Explicit 6.10. Contrairement aux modé-
36 lisations d’impact avec des impacteurs ri-
37 gides, il est nécessaire ici de prendre en
38 compte la déformabilité de la cible mais éga-
39 lement celle, plus importante, de l’impacteur
40 et leurs interactions.

41 **3.1 Comportement**

42 **De l’impacteur en caoutchouc**

43 La loi de comportement hyperélastique de
44 Mooney-Rivlin [4, 5], couramment utilisée
45 pour modéliser le comportement de caou-
46 tchoucs dans des études aéronautiques ou

automobiles en particulier, est retenue ici. 47
Le modèle de Mooney-Rivlin est basé sur un 48
potentiel énergétique composé d’une par- 49
tie déviatorique et d’une partie hydrosta- 50
tique, décrit, pour les matériaux incompres- 51
sibles, par l’équation (1). 52

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) \quad (1)$$

où les paramètres C_{10} et C_{01} dépendent de 53
la température. I_1 et I_2 désignent les premier 54
et second invariants du tenseur des défor- 55
mations. Cette loi implémentée dans Aba- 56
qus/Explicit est utilisée ici. 57

Les paramètres C_{10} et C_{01} sont identi- 58
fiés à partir d’essais de compression quasi- 59
statiques de l’impacteur décrit dans [6]. 60
Après identification, on obtient : $C_{01} =$ 61
0,35 MPa pour une dureté de 40 SHA, $C_{01} =$ 62
0,90 Mpa pour une dureté de 60 SHA et 63
 $C_{01} = 2$ Mpa pour 80 SHA. Dans tous les 64
cas, le paramètre C_{10} a été posé égal à 0. 65

Le modèle éléments finis est construit 66
avec des éléments solides C3D8R. Une di- 67
mension de maille de 3 mm a été sélection- 68
née à la suite d’une étude convergence, pour 69
des tailles d’éléments allant de 1 à 10 mm. 70

Ce modèle, identifié en statique grâce 71
à des essais d’impact sur plaque alumi- 72
nium dont le comportement est parfaite- 73
ment connu, a été ensuite validé en dyna- 74
mique [6]. 75

De la cible composite 76

Le matériau modélisé est le I55 (*interlock 3X* 77
55 %). Pour cette première étape de modé- 78
lisation, il est modélisé à l’échelle macro- 79
scopique en le considérant comme un maté- 80
riau homogène. Une loi de comportement de 81
type Ladevèze a été sélectionnée. Construite 82
au départ pour des matériaux composites 83
stratifiés UD [7], elle a été étendue aux com- 84
posites tissés par Johnson et Simon [8] et 85
implémentée dans le logiciel de calcul Aba- 86
qus/Explicit en tant que subroutine VUMAT. 87

**3.2 Maillage, chargement 88
et conditions aux limites 89**

La plaque composite de dimension 100 mm 90
× 100 mm × 2,7 mm a été maillée avec des 91
éléments coques S4R de taille caractéristique 92

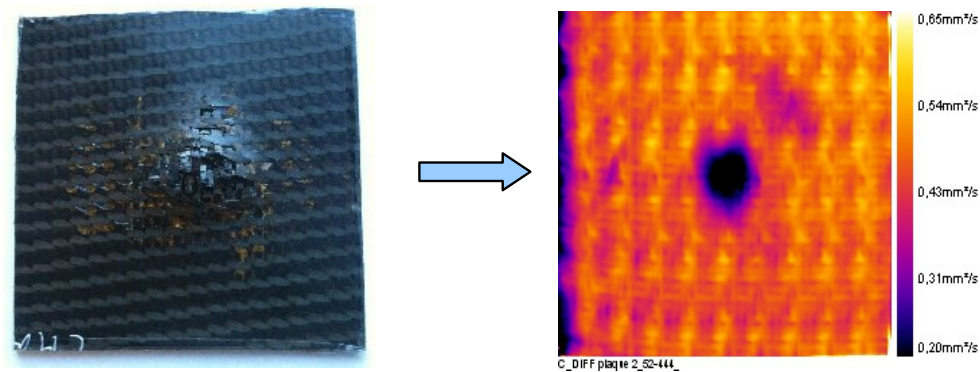


Fig. 4. Carte de diffusivité obtenue par thermographie.

Fig. 4. Map of diffusivity issued from thermography method.

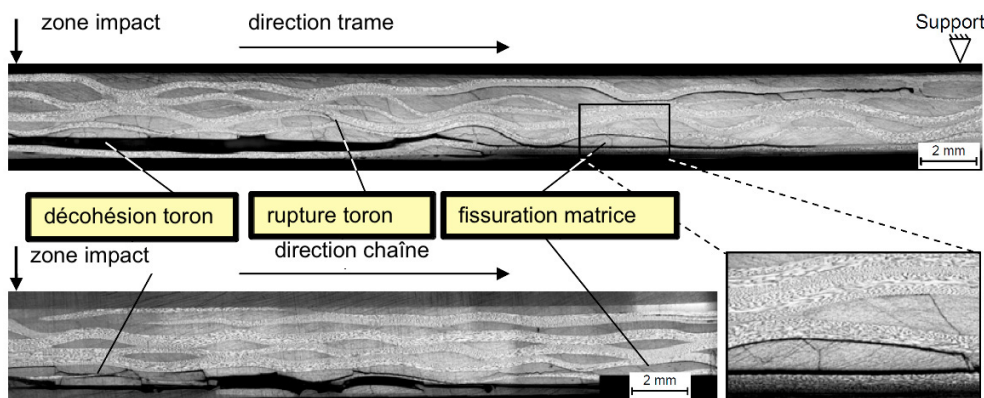


Fig. 5. Micrographies après impact de 100 J sur une plaque composite interlock 3X 55 %.

Fig. 5. Micrographies coming from interlock 3X 55% fabric after a 100J impact.

de 2 mm, avec contrôle de l'énergie d'hourglass. Tous les nœuds du bord circulaire de diamètre 70 mm ont été bloqués selon la direction z de l'impact. Au delà de cette circonférence, tous les noeuds ont été bloqués dans les 3 directions x , y et z , pour représenter au mieux les conditions expérimentales. La gravité ainsi qu'une vitesse initiale ont été introduites pour l'impacteur. Cinq énergies incidentes d'impact ont été considérées : 50 J, 63 J, 75 J, 88 J and 100 J associées à des hauteurs de chute variant de 1 à 2 m.

Le temps simulé est de 10 ms conduisant à un temps CPU de 30 mn par simulation.

4 Résultats

4.1 Résultats expérimentaux

Analyse des endommagements de la cible I55

Pour des énergies incidentes de l'ordre de 50 J, aucun endommagement n'est révélé

dans la réponse globale, figure 6. Cela se traduit par des courbes de réponse plutôt lisses ; il n'y a pas les fortes oscillations au début du contact qui sont habituellement observées lors d'essais d'impact avec des impacteurs rigides. En revanche, pour des énergies incidentes de l'ordre de 100 J, des oscillations apparaissent au sommet de la courbe traduisant le développement d'endommagements. Leur amplitude, à un instant t donné, dépend de la nature et de l'ampleur des endommagements développés. Les cartes de diffusivité thermique, obtenues à l'issue de mesures thermographiques montrent un début d'endommagement à partir d'une énergie de l'ordre de 80 J, figure 7 ; celui-ci devenant significatif pour une énergie de 100 J. Toutefois, les échantillons ne sont pas perforés pour ces niveaux d'énergies avec les conditions aux limites appliquées (échantillon encastré sur le pourtour circulaire de diamètre 70 mm).

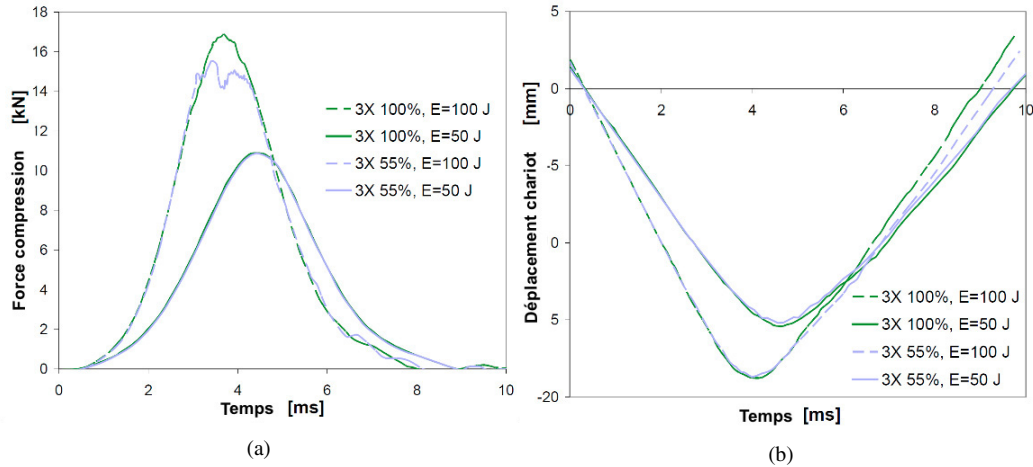


Fig. 6. (a) Courbes de force en fonction du temps. (b) Déplacement du chariot, obtenues lors d'essais sur plaques composites interlock 3X 55 % et 100 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et dureté 60 SHA.

Fig. 6. (a) Force versus time curve. (b) Carriage displacement versus time concerning interlock 3X 55% and 100% fabrics with rubber impactor of 40 mm diameter and 60 SHA hardness.

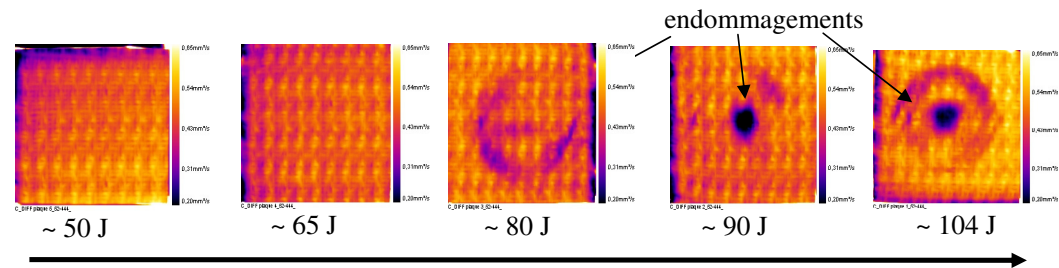


Fig. 7. Cartes de diffusivité obtenues par thermographie.

Fig. 7. Map of diffusivity issued from thermography method.

1 Les analyses micrographiques, figure 5,
2 montrent que les endommagements obser-
3 vés sont des décohésions de torons, des
4 fissures apparaissant dans les zones inter-
5 torons riche en résine et des fissures intra-
6 torons. Deux zones d'endommagement se
7 distinguent en particulier : l'une sous la sur-
8 face de contact impacteur/cible et l'autre au
9 voisinage des conditions aux limites encas-
10 trées ici. Sous la zone de contact impac-
11 teur/cible, il n'y a pas de cône d'endom-
12 magement habituellement observé dans les
13 impacts sur composites stratifiés UD avec
14 des impacteurs rigides. Du fait de sa grande
15 déformabilité, la force d'impact se répartie
16 sur une surface de contact importante ;
17 de ce fait, il n'y a pas de concentration
18 de contraintes en cisaillement au voisinage
19 de l'impacteur. Ici, les contraintes influentes
20 sont les contraintes de traction justifiant l'ap-
21 parition des endommagements majoritaire-

ment dans la moitié inférieure du composite.
Au voisinage des conditions aux limites, les
endommagements apparaissent non seule-
ment sur la moitié supérieure du compo-
site qui est localement en traction (du fait
de la flexion locale du composite au voi-
sinage de l'encastrement), mais également
sur toute l'épaisseur du fait du cisaillement
hors plan (transverse) important dans cette
zone. Ainsi sur la figure 5, une décohésion
importante d'un toron trame supérieur se
propage depuis le bord vers le centre, et in-
versement, une décohésion importante d'un
toron trame se propage depuis le centre vers
les bords. La répartition des endommage-
ments laisse penser que les zones de croise-
ment de torons trames et chaînes sont des
zones privilégiées pour leur apparition. Ces
croisements créent des ondulations des to-
rons et des zones de pincement entre torons
trames et chaînes. Lors d'une mise en trac-

22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43

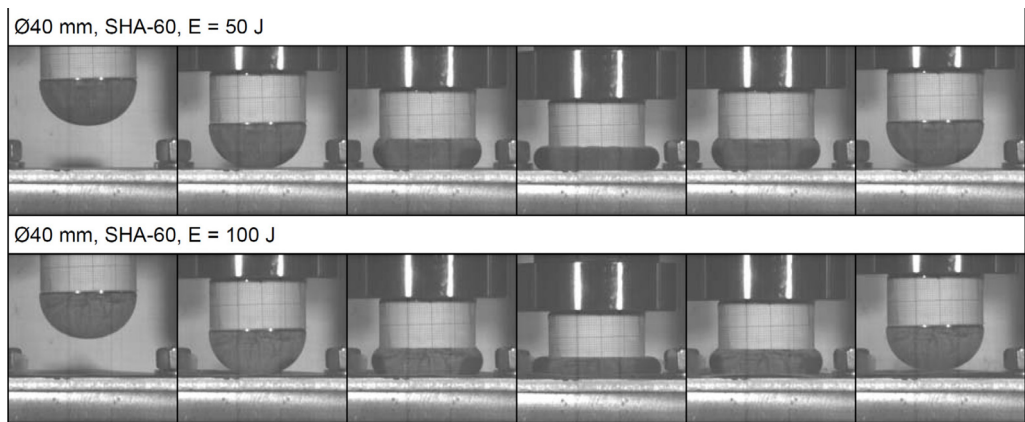


Fig. 8. Déformation de l'impacteur caoutchouc lors d'un impact sur une plaque en aluminium.
Fig. 8. Crushing of rubber impactor on alloy plate.

tion dans le sens chaîne, les torons chaînes déviés dans l'épaisseur vont avoir tendance à se réaligner suivant la direction de sollicitation et augmenter le pincement entre torons chaînes et trames, favorisant ainsi des concentrations de contraintes.

Analyse de la déformation de l'impacteur

D'après la série de photos prises par caméra rapide lors de l'impact sur plaque composite interlock I55, figure 8, la déformation élastique de l'impacteur est très importante réduisant d'autant l'énergie absorbée par la cible. La surface maximale de contact diminue avec l'augmentation de la dureté de l'impacteur. Le contour de cette surface de contact est quasiment circulaire; son diamètre sera retenu comme indicateur à corrélérer ultérieurement à l'endommagement. Pour l'impacteur de diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA, ce diamètre varie entre 46 et 49 mm pour une énergie incidente de 100 J.

4.2 Résultats numériques

Modèle de comportement

Dans un premier temps, des simulations d'une éprouvette sollicitée en traction quasi-statique ont été réalisées afin de voir les limites du modèle de comportement de Ladevèze utilisé ici. Comme en témoigne la figure 9, les courbes montrent que pour une déformation inférieure à 0,6 %, correspondant à la déformation élastique, les

résultats expérimentaux et numériques se superposent bien. Les résultats expérimentaux dont il est question ici ont été réalisés sur des éprouvettes de dimensions utiles $300 \times 32 \times 2,7 \text{ mm}^3$ respectivement sollicitées selon le sens chaîne (Fig. 9a), le sens trame (Fig. 9b) et à 45° (Figs. 9c et 9d). Des essais de cyclage ont été réalisés à 45° pour établir la loi de comportement élasto-plastique endommageable en cisaillement [6].

Les résultats montrent que le modèle de Ladevèze n'est pas adapté pour prendre en compte l'évolution des endommagements de l'interlock 3X 55 % en particulier dans les directions chaînes et trame, figures 9a et 9b. Malgré une bonne corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux observée jusqu'à une déformation de l'ordre de 0,6 % correspondant au début de l'endommagement, le modèle et l'expérience divergent significativement au delà de cette valeur de déformation. En l'état, il n'est pas capable de prendre en compte l'effet de réalignement des torons et l'effet encore plus particulier des torons chaînes 3D sur l'évolution des endommagements. Des investigations supplémentaires consistant à réaliser des essais de cyclage dans les directions chaîne et trame pour mieux décrire la loi d'évolution de l'endommagement sont en cours.

Simulations dynamiques

Les clichés numériques de la figure 10. rendent compte du comportement de l'impacteur et de la cible pendant la phase de choc. Les courbes déplacement-temps

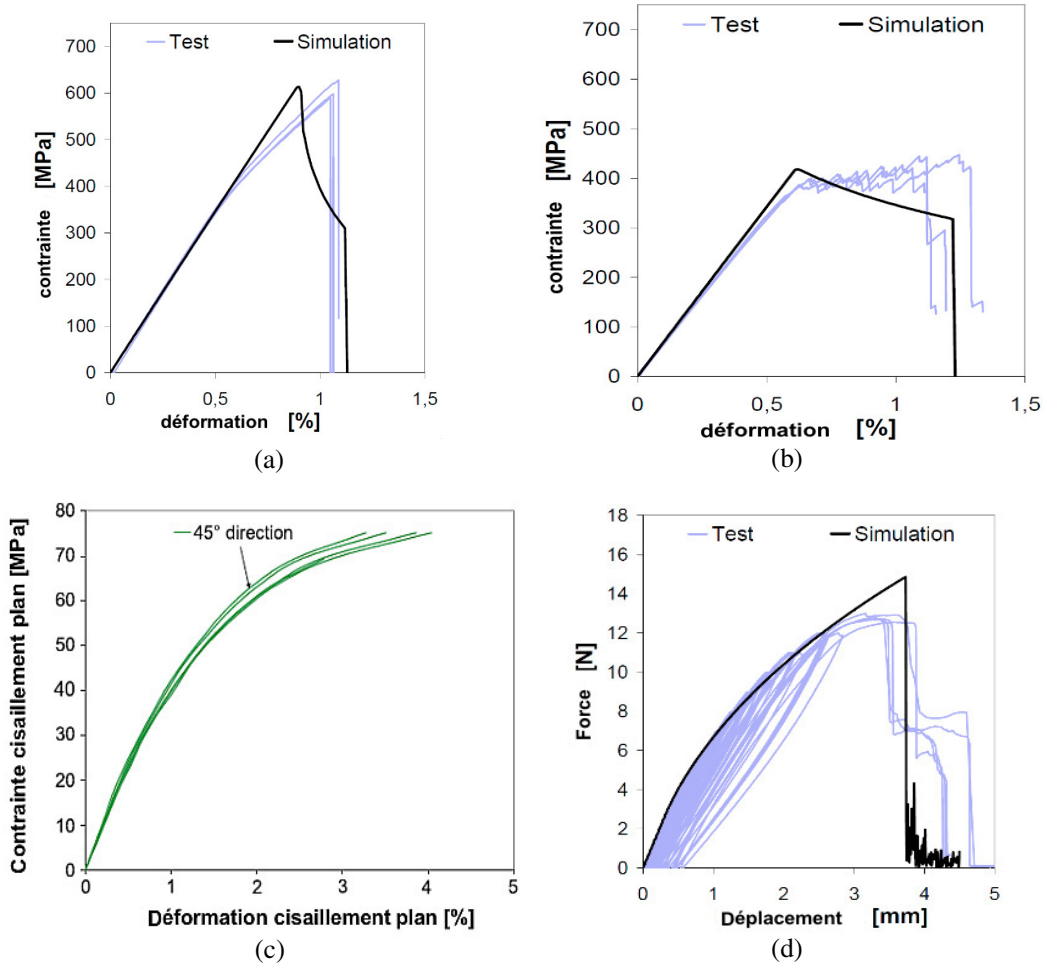


Fig. 9. Numerical and experimental comparisons for interlock 3X 55% fabrics, (a) traction along the warp direction, (b) traction along the weft direction, (c) traction along 45° direction, (d) Cyclic traction along 45° direction.

Fig. 9. Comparaison des résultats expérimentaux de traction en quasi-static et des simulations pour l'interlock 3X 55 %, (a) traction dans la direction chaîne, (b) traction dans la direction trame, (c) traction à 45°, (d) essai de cyclage en traction à 45°.

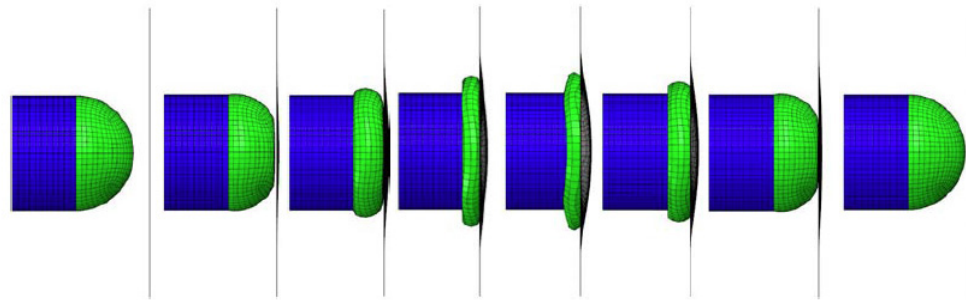


Fig. 10. Simulation numérique du choc mou pour la cible composite en interlock I55.

Fig. 10. Numerical simulations of the soft impact concerning interlock I55 fabric.

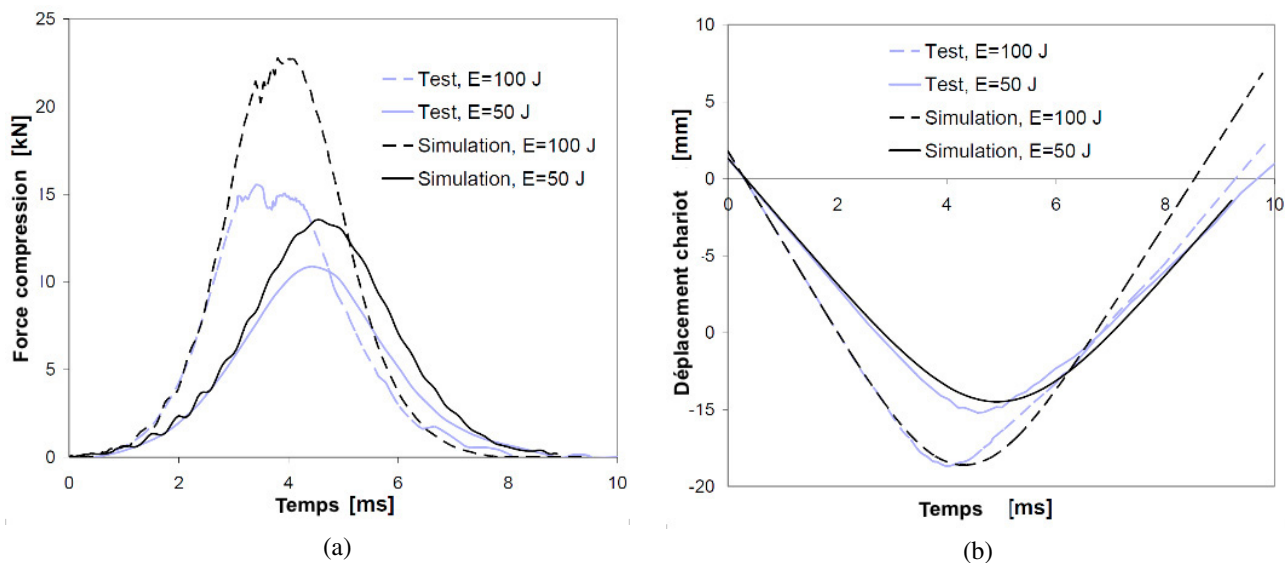


Fig. 11. Comparaison entre les résultats des essais expérimentaux et les simulations obtenus pour des impacts sur plaques interlock 3X 55 %, avec un impacteur caoutchouc de diamètre 40 mm et de dureté 60 SHA, (a) courbes force-temps, (b) courbes déplacement chariot-temps.

Fig. 11. Comparison between numerical and experimental results on interlock 3X 55% plate impacted by a 40 mm diameter and 60 SHA hardness rubber, (a) force versus time curve, (b) carriage displacement versus time curve.

1 simulées pour des énergies incidentes de
2 50 J et 100 J sont pratiquement superpo-
3 sables à celles obtenues expérimentalement,
4 figure 11. Elles ont cependant tendance à lé-
5 gèrement sous estimer le déplacement. En
6 revanche, pour ce qui est de l'évolution
7 force-temps, figure 10a, même si les allures
8 sont comparables, un écart significatif entre
9 expérimental et numérique est observé. En
10 effet, le niveau de force prédit numérique-
11 ment est largement surestimé, bien que, par
12 ailleurs, le temps de contact soit correcte-
13 ment restitué. Cette surestimation peut s'ex-
14 pliquer par une rigidité trop importante de
15 la cible impactée. Au delà d'une déformation
16 de 0,6 %, figure 9, cette hypothèse est confor-
17 tée par le fait que les courbes se confondent
18 au début et divergent lorsque la déforma-
19 tion devient importante (au delà de 0,6 %).
20 Un modèle de comportement mieux adapté
21 serait donc nécessaire à ce niveau.

22 D'autres raisons comme l'insuffisance
23 d'une modélisation plaque de ~~l'impacteur~~
24 pour rendre compte des modes d'endom-
25 magements complexes dans l'épaisseur, la
26 validation du comportement de l'impacteur
27 uniquement pour des déformations modé-
28 rées ainsi que l'idéalisation des conditions

aux limites par un encastrement peuvent
être avancées.

Une évaluation numérique de l'endom-
magement généré dans la plaque composite
(cible) est proposée figure 12. Les valeurs des
paramètres d'endommagement en traction
et compression dans les directions chaînes
et trames ainsi qu'en cisaillement, au bout
de 10 ms, sont mentionnées. Ces valeurs var-
ient entre 0 (pas d'endommagement) et 1
(niveau d'endommagement maximum). Des
tentatives de comparaison, purement quali-
tative, avec les résultats des cartes de diffusi-
vité obtenues par thermographie, montrent
l'existence de 2 zones d'endommagement
distinctes : une au voisinage de l'impacteur
et l'autre au voisinage de l'encastrement. Par
ailleurs, l'endommagement croît avec la vi-
tesse d'impact. Pour les plus faibles vitesses
d'impact, aucun endommagement n'est ob-
servé dans la direction chaîne 1.

5 Conclusions

Cette phase 1 du projet aura donc permis i) la
réalisation d'un montage spécifique et d'une
métrologie adaptée pour la mise en évidence
d'endommagements dans le cas d'un impact

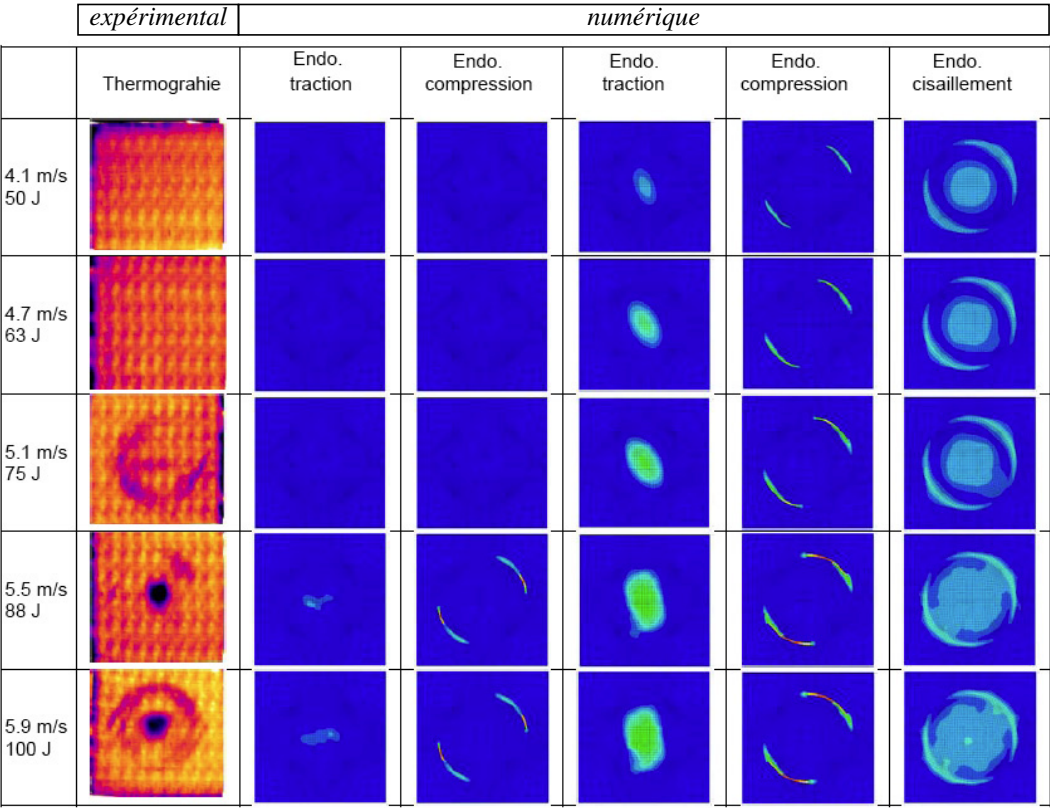


Fig. 12. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques : répartition des endommagements.
Fig. 12. Damage distribution maps. Numerical and experimental results.

1 élastomère/composite interlock 3X ii) la faisabilité de suivi par vidéos rapides permettant la reconstruction de champs de déplacement visant l'identification future de lois d'endommagements iii) le diagnostic des endommagements par un moyen d'analyse 'simple' et efficace qu'est celui de la thermographie IR iv) la mise en évidence des différentes natures d'endommagements de l'interlock 3X par analyses micrographiques v) la simulation numérique du choc mou.

12 La confrontation des premiers résultats de simulations numériques aux résultats d'essais expérimentaux a montré des résultats prometteurs malgré les écarts significatifs observés sur la prévision de la force de contact. La prise en compte des raisons avancées dans le Section 5.2 pour justifier ces écarts devraient permettre d'améliorer significativement les résultats.

21 **Remerciements**

22 Les auteurs tiennent à remercier le programme
23 Matériaux et Procédés de l'ANR pour son soutien

financier au projet VULCOMP-Phase 1 coordonné par EADS.

Références

[1] Y. Duplessis-Kergomard, F. Dau, L. Guillaumat, Analyse paramétrique d'un essai sur plaques stratifiées, propice à l'apparition du délaminage et de la fissuration intralaminare, proceedings JNC16, 2009, Toulouse, France

[2] F. Dau, Y. Duplessis-Kergomard, Study on interlock 3X damage mechanisms under impact loading using a deformable impactor, in proceedings ICEM 14, 2010, Poitiers, France

[3] J.N. Périé, H. Leclerc, S. Roux, F. Hild, *Int. J. Solids Struct.* **46** (2009) 2388-2396

[4] M. Mooney, *J. Appl. Phy.* **11** (1940) 582-592

[5] R.S. Rivlin, *Philosophical Transactions of The Royal Society of London* **A240** (1948) 459-490

[6] S. Heimbs, B. Van Den Broucke, Y. Duplessis Kergomard, F. Dau, Rubber Impact on 3D Textile Composites, Applied Composite Materials, 2011

1 [7] P. Ladeveze, A damage mesomodel of lami- 11
2 nate composites. In Handbook of Materials 12
3 Behaviour Models, Section 10. 6, Publisher 13
4 Academic Press, Editor Lemaitre, J., Vol. 3, 14
5 2001, pp. 1004-1014 15
6 [8] A.F. Johnson, J. Simon, Modelling fabric 16
7 reinforced composites under impact loads, 17
8 in Euromech 400 : Impact and Damage 18
9 Tolerance of Composite Materials and 19
10 Structures, London, 1999, pp. 27-29 20

[9] L. Guillaumat, J.C. Batsale, D. Mourand, 11
Real time infrared image processing for 12
the detection of delamination in composite 13
plates, Composites part A : 35, 2004, pp. 939- 14
944 15
[10] D. Maillet, S. André, J.C. Batsale, 16
A. Degiovanni, C. Moyne, Thermal 17
quadrupoles- Solving the heat equation 18
through integral transforms- J. Wiley 19
Editeur-Chichester, 2000, 270 p. 20